

การเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กจากการจัดเรียงตัวของสายส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV ที่มีผลต่อมนุษย์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A Comparison of Magnetic Field due to Conductor Alignments of 115 kV Transmission Line effecting on human by Using Finite Element Method

อานนท์ อิศรมงคลรักษ์¹ ชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์¹ วรยุทธ คัมภีรวัฒน์¹ และ เพ็ญใจ เป่าละออ²

Arnon Isaramongkolrak¹ Chaeyut Sumpavakup¹ Warayut Kampeerawat¹ and Padej Pao-la-or²

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

โทร. 0-2988-5666 ต่อ 3304 E-mail: arnon@mut.ac.th

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

โทร. 0-4422-4401

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของสายส่งกำลังไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย แบบจำลองดังกล่าวถูกนำมาใช้จำลองผลของสนามแม่เหล็กเนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายส่งกำลังไฟฟ้าที่กระจายลงมาถึงมนุษย์ที่สัญจรอยู่ใต้สายส่งกำลังไฟฟ้าภายในเขตเดินสายไฟโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในที่นี้พิจารณาระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดี่ยว ซึ่งโดยทั่วไปมีการจัดเรียงตัวนำ 3 รูปแบบคือ แบบแนวนอน แบบสามเหลี่ยมและแบบแนวตั้ง จากผลการเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายอยู่ในเขตเดินสายส่งที่ระยะความสูงเฉลี่ยของมนุษย์ พบว่าเมื่อมีการจัดเรียงตัวนำแบบแนวนอนจะให้ค่าสนามแม่เหล็กมากที่สุด รองลงมาคือแบบสามเหลี่ยม และแบบแนวตั้ง ตามลำดับ โดยที่ทั้งสามแบบมีค่าสนามแม่เหล็กไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน ICNIRP สำหรับผู้ที่ทำงานในเขตสายส่งโดยมีช่วงเวลางานตลอดทั้งวัน

Abstract

This paper proposes the mathematical model of magnetic fields distributing around power transmission line in the form of complex partial differential equation. The proposed model was used to simulate the magnetic field distributing near the row of ways from different conductor alignments of

transmission line by using the finite element method. In this paper, the single-circuit 115 kV transmission line having three typical forms of conductor alignments; i.e., horizontal, vertical and triangular alignment was considered. The comparison results showed that the horizontal alignment provided the most magnetic field density and that of the triangular alignment and the vertical alignment were the second and the third, respectively. However, the amount of magnetic field density from each alignment was lower than the hazardous value based on ICNIRP's standard for the human who work all day in any public place near the row of way.

1. บทนำ

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในประเทศไทยแบ่งระดับของแรงดันออกเป็น 4 ระดับ คือ ระดับแรงดันต่ำ ระดับแรงดันปานกลาง ระดับแรงดันสูงและระดับแรงดันสูงพิเศษ [3] โดยที่แต่ละระดับแรงดันจะมีโครงสร้างการวางตัวของกลุ่มตัวนำ (Conductor Alignment) และเสาไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวออกมาจากสายส่งกำลังไฟฟ้ามีความแตกต่างกัน โดยขนาดของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งและระยะห่างระหว่างจุดที่พิจารณากับกลุ่มตัวนำสายส่ง บทความ

นี้ได้นำมาเปรียบเทียบถึงผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากรูปแบบการวางตัวของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดี่ยว ที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่แบบแนวนอน แบบสามเหลี่ยม และแบบแนวตั้ง ที่ส่งผลต่อบุคคลที่สัญจรอยู่ข้างล่างในแนวเขตเดินสายไฟ จำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) แบบ 2 มิติ ด้วยโปรแกรม MATLAB อีกทั้งดำเนินการเปรียบเทียบระดับอันตรายของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองผลกับมาตรฐาน ICNIRP (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection)

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก [1]

แบบจำลองของสนามแม่เหล็กที่กระจายรอบบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในรูปแบบ 2 มิติสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (1)

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \left(\frac{1}{v^2}\right) \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}\right) - \mu \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}\right) = 0 \quad (1)$$

จากคุณสมบัติของระบบที่เป็น Time-harmonic อย่างเช่นในระบบสายส่งไฟฟ้าจะได้

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \approx j\omega \mathbf{H} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \approx -\omega^2 \mathbf{H}$$

จากสมการที่ (1) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ (2)

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} + (\mu \epsilon \omega^2 - j\mu \sigma \omega) \mathbf{H} = 0 \quad (2)$$

โดยที่ $\mu = \mu_0 \mu_r$ และ $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ เมื่อ μ_r คือ สภาพซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์และ ϵ_r คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ ซึ่ง $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างด้วยวิธีกาลอร์คิน ซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ดังสมการที่

(3) ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function: W) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอิลิเมนต์ (Δ_e) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ดังสมการที่ (4) ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

$$R = D_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - G\phi + Q \quad (3)$$

$$-\int_{\Delta_e} W_n R d\Delta_e = 0, \quad n = 1, 2, 3 \quad (4)$$

จากนั้นดำเนินการจัดรูปสมการรวมของระบบให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (5) เพื่อหาค่าผลเฉลย [6]

$$[K]\{H\} = \{f\} \quad (5)$$

โดยที่

$[K]$ คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของระบบรวม

$\{H\}$ คือ เวกเตอร์สนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าที่ตำแหน่ง

โนดต่าง ๆ

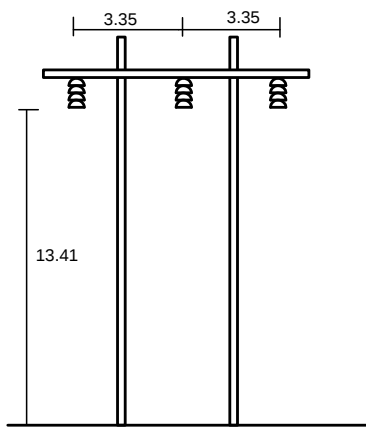
$\{f\}$ คือ เวกเตอร์สนามแม่เหล็กภายนอกที่มากระทำที่ตำแหน่งโนดต่าง ๆ

$$[K] = \frac{1}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} b_i^2 & b_i b_j & b_i b_k \\ b_i b_j & b_j^2 & b_j b_k \\ b_i b_k & b_j b_k & b_k^2 \end{bmatrix} + \frac{1}{4\Delta_e} \begin{bmatrix} c_i^2 & c_i c_j & c_i c_k \\ c_i c_j & c_j^2 & c_j c_k \\ c_i c_k & c_j c_k & c_k^2 \end{bmatrix} - \frac{(-\mu \epsilon \omega^2 + j\mu \sigma \omega) \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

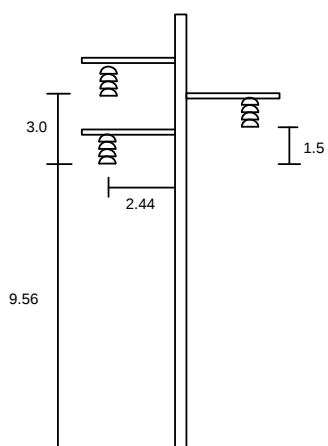
$$\{H\} = \begin{bmatrix} H_i \\ H_j \\ H_k \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \{f\} = \frac{Q\Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

3. ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

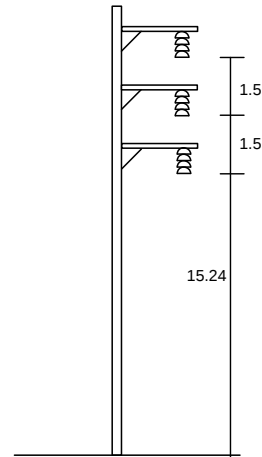
ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่เกี่ยวข้องกับการส่งกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังกลุ่มโหลดที่กระจายอยู่ตามภูมิภาคต่าง ๆ โดยดำเนินการส่งจ่ายด้วยระบบส่งไฟฟ้าแรงสูง 69 kV 115 kV 230 kV และ 500 kV ลักษณะของเสาไฟฟ้าก็จะแตกต่างกันตามพิกัดของแรงดัน ในบทความนี้พิจารณาลักษณะของเสาไฟฟ้าที่พิกัดแรงดัน 115 kV วงจรเดี่ยวเท่านั้น โดยเสาไฟฟ้าระบบ 115 kV วงจรเดี่ยวจะมีรูปแบบของการวางตำแหน่งตัวนำเป็น 3 แบบ คือ แบบแนวนอน แบบสามเหลี่ยม และแบบแนวตั้งแสดงดังรูปที่ 1-3 [2]



รูปที่ 1 การวางตำแหน่งตัวนำแบบแนวนอน



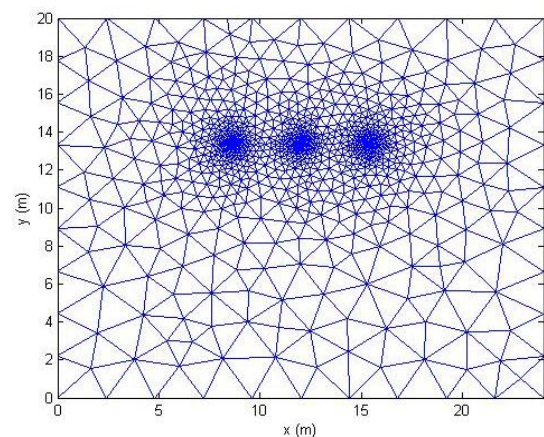
รูปที่ 2 การวางตำแหน่งตัวนำแบบสามเหลี่ยม



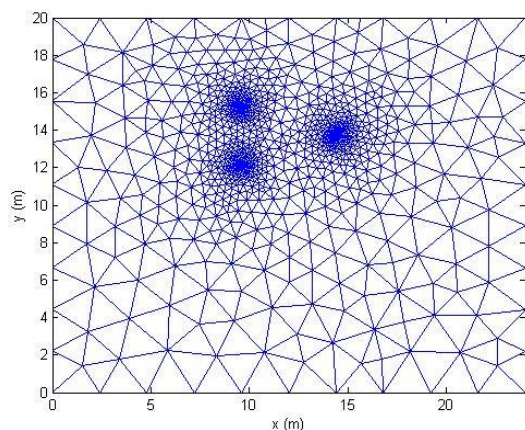
รูปที่ 3 การวางตำแหน่งตัวนำแบบแนวตั้ง

4. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

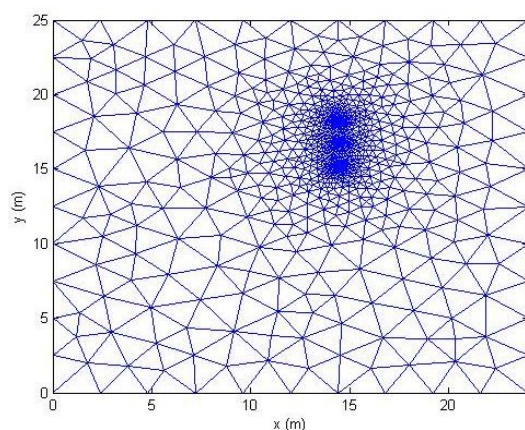
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นอีลิเมนต์ แล้วสร้างสมการของแต่ละอีลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และอีลิเมนต์ต่าง ๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณหาผลเฉลยแบบประมาณ [4] บทความนี้ได้วิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้า 115 kV โดยมีการเรียงตัวของตัวนำ 3 แบบดังที่กล่าวมาข้างต้น ผลการแบ่งรูปร่างของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV ที่มีการวางตำแหน่งตัวนำทั้ง 3 แบบออกเป็นอีลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4 แบ่งรูปร่างของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV ที่มีการวางตำแหน่งตัวนำแบบแนวนอนออกเป็นอีลิเมนต์



รูปที่ 5 แบ่งรูปร่างของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV ที่มี การวางตำแหน่งตัวนำแบบสามเหลี่ยมออกเป็นอิลิเมนต์



รูปที่ 6 แบ่งรูปร่างของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV ที่มี การวางตำแหน่งตัวนำแบบแนวตั้งออกเป็นอิลิเมนต์

5. การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและพารามิเตอร์

บทความนี้ได้อาศัยหลักการคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยวิธี พื้นฐาน [5] เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กบริเวณขอบของ ตัวนำสายส่งในแต่ละรูปแบบการจัดเรียงซึ่งค่าสนามแม่เหล็ก ที่พิจารณาจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริงและส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ และกำหนดให้ค่าสนามแม่เหล็กที่ บริเวณขอบของตัวนำแต่ละเส้นมีค่าเท่ากันบทความนี้ กำหนดให้กระแสที่ไหลในแต่ละเฟสมีค่าเท่ากับ 145 A [2] ซึ่งเป็นค่ากระแสมากที่สุดสำหรับสายส่งชนิด AAC โดยค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งขอบของตัวนำในแต่ละรูปแบบการจัดเรียงสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

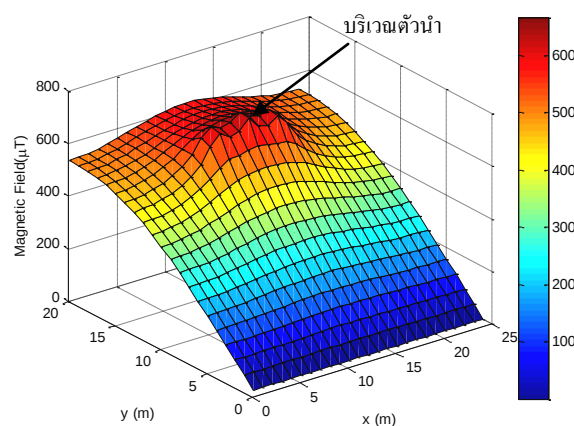
ตารางที่ 1 ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี พื้นฐาน ณ ตำแหน่งขอบของตัวนำเมื่อมีการจัดเรียงตำแหน่ง ตัวนำในแบบต่าง ๆ

ตัวนำเฟส	ค่าสนามแม่เหล็กที่ขอบตัวนำ (μT)		
	การจัดเรียงตัวนำแบบแนวนอน	การจัดเรียงตัวนำแบบสามเหลี่ยม	การจัดเรียงตัวนำแบบแนวตั้ง
A	566.65+j576.72	716.92+j555.92	576.70+j570.02
B	550.65+j602.37	578.27+j579.93	553.23+j599.77
C	573.88+j591.47	724.95+j557.08	606.68+j551.04

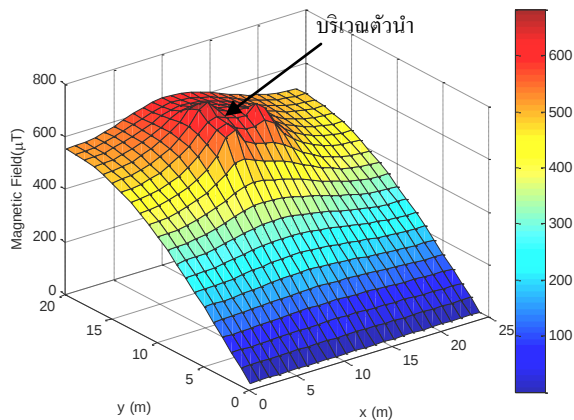
ตัวนำที่ใช้ในการจำลองผลระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV จะกำหนดให้สายส่งเป็นอลูมิเนียมเปลือยที่มีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 cm และค่าคงที่ทางไฟฟ้าของตัวนำมีค่า ดังต่อไปนี้ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (ϵ_r) เป็น 3.5 ค่า ความนำไฟฟ้า (σ) เป็น 0.8×10^7 และค่าซึมซาบได้ทาง แม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r) เป็น 300 [6]

6. ผลการจำลอง

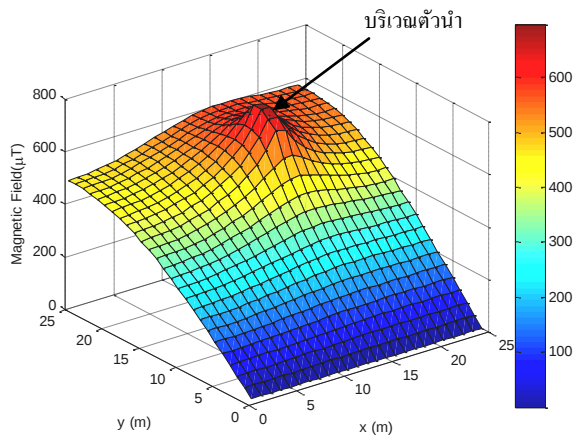
การจำลองผลในบทความนี้ใช้โปรแกรม MATLAB ที่พัฒนา อัลกอริทึมขึ้นเองเพื่อช่วยในการวิเคราะห์หาค่าสนามแม่เหล็ก โดยวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายออก จากสายส่งตัวนำ เมื่อมีการจัดเรียงตัวนำแบบแนวนอน แบบ สามเหลี่ยม และแบบแนวตั้ง ที่ระยะ ความ สูง ต่าง ๆ ซึ่งผลการจำลองในเชิงกราฟฟิกแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 7 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) เมื่อจัดเรียงตัวนำ แบบแนวนอน



รูปที่ 8 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) เมื่อจัดเรียงตัวนำแบบสามเหลี่ยม



รูปที่ 9 การกระจายสนามแม่เหล็ก (μT) เมื่อจัดเรียงตัวนำแบบแนวตั้ง

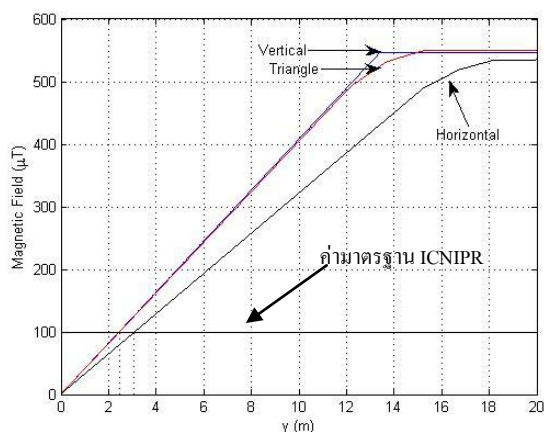
รูปที่ 7, 8 และ 9 แสดงการกระจายสนามแม่เหล็กเมื่อมีการจัดเรียงตัวนำแบบแนวนอน แบบสามเหลี่ยมและแบบแนวตั้ง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีค่ามากที่สุดที่บริเวณตำแหน่งของตัวนำและจะมีค่าลดลงไปเมื่อระยะห่างจากตัวนำมีค่ามากขึ้น โดยที่ระยะความสูง 1.7 m (ความสูงเฉลี่ยของมนุษย์) ค่าสนามแม่เหล็กเมื่อมีการจัดเรียงตัวนำแบบแนวนอน สามเหลี่ยมและแบบแนวตั้งมีค่าเท่ากับ $69.4392 \mu\text{T}$ $68.8741 \mu\text{T}$ และ $54.8296 \mu\text{T}$ ตามลำดับ จากตารางที่ 3 แสดงค่าสนามแม่เหล็กตามมาตรฐาน ICNIRP ซึ่ง

จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจัดเรียงตัวนำทั้ง 3 แบบนี้ อยู่ในระดับที่มนุษย์สามารถสัมผัสไปมาได้โดยไม่ก่อให้เกิดอันตราย เนื่องจากค่าสนามแม่เหล็กตามมาตรฐาน ICNIRP กำหนดว่าต้องมีค่าสนามแม่เหล็กไม่เกิน $100 \mu\text{T}$ เมื่อมีการทำงานในสถานที่สาธารณะตลอดทั้งวันและจากการดำเนินงานพบว่า ถ้าพิจารณาตามระยะความสูงดังตารางที่ 2 เมื่อมีการจัดเรียงตัวนำแบบแนวนอน ระยะความสูงที่ค่าสนามแม่เหล็กอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ICNIRP ที่ไม่มีผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ต้องไม่เกิน 2.45 m แบบสามเหลี่ยมระยะความสูงต้องไม่เกิน 2.47 m และแบบแนวตั้งระยะความสูงต้องไม่เกิน 3.10 m จากรูปที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจัดเรียงตัวนำทั้ง 3 แบบ โดยค่าสนามแม่เหล็กจากการจัดเรียงตัวนำแบบแนวนอนและแบบสามเหลี่ยมจะมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจัดเรียงตัวนำแบบแนวตั้ง โดยที่ค่าสนามแม่เหล็กจากการจัดเรียงตัวนำทั้งสามแบบมีค่าน้อยกว่าค่าสนามแม่เหล็กตามมาตรฐาน ICNIRP เมื่อพิจารณาที่ความสูงเฉลี่ยของมนุษย์

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก เมื่อมีการจัดเรียงตัวนำในแต่ละแบบที่ระยะความสูงต่าง ๆ

ระยะความสูง y (m)	ค่าสนามแม่เหล็ก (μT)		
	การจัดเรียงแบบแนวนอน	การจัดเรียงแบบสามเหลี่ยม	การจัดเรียงแบบแนวตั้ง
0	0.1013	0.1234	0.1003
1	41.0532	40.7768	32.5529
1.70*	69.4392	68.8741	54.8296
2	81.6338	80.9483	64.3887
2.45	99.9562	99.1036	78.7855
2.47	100.7712	99.9116	79.4268
3.10	126.4610	125.3964	99.6733
4	163.2101	161.8486	128.6620
6	244.7931	242.7157	192.9955
8	326.2843	323.4882	257.3182
10	407.7214	404.2357	321.5730
12	489.0574	484.7361	385.7483
14	546.5114	535.3540	449.7686
16	546.7819	549.6708	504.3919
18	546.9665	549.8615	532.2726
20	547.1964	550.0918	535.0922

*ความสูงเฉลี่ยของคนไทย (อ้างอิง: Technology learning center)



รูปที่ 10 ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจัดเรียงตัวนำแบบต่าง ๆ เทียบกับค่ามาตรฐานของ ICNIRP

ตารางที่ 3 ค่าสนามแม่เหล็กตามมาตรฐาน ICNIRP สำหรับระบบไฟฟ้า 50Hz

กิจกรรม	ค่าสนามแม่เหล็ก (μT)
สถานประกอบการ	
- ตลอดทั้งวัน	500
- ช่วงเวลาสั้น (2 ชั่วโมง/วัน)	5000
สถานที่สาธารณะ	
- ตลอดทั้งวัน	100
- 2-3 ชั่วโมง/วัน	1000

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบการจัดเรียงของตัวนำสายส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียว ที่มีผลต่อค่าสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเปรียบเทียบถึงผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์เทียบกับมาตรฐาน ICNIRP ซึ่งผลจากการดำเนินงานเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับบุคคลหรือผู้ที่เกี่ยวข้องที่ต้องทำงานหรืออยู่ในแนวเขตเดินสายไฟของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV เพราะจะได้ทราบถึงระยะความสูงที่ปลอดภัยในการเข้าใกล้สายส่งกำลังไฟฟ้า เมื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวนำทั้งแบบแนวนอน แบบสามเหลี่ยม และแบบแนวตั้ง โดยค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองทั้ง 3 แบบมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ICNIRP ดังตารางที่ 3

เอกสารอ้างอิง

- [1] Matthew N.O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetics", CRC Press, Boca Raton London New York Washington D.C., 2000.
- [2] ชวลิต คำรงรัตน์, "การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า", ซีเอ็ดดูเคชั่น กรุงเทพฯ, 2553.
- [3] ธนัชชัย กุลรวานิชพงษ์, "ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า", จรัสสินทวงศการพิมพ์, กรุงเทพฯ, 2552.
- [4] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, "ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2542.

[5] พัทธกัญ ปิ่นอนงค์, “การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.

[6] อานนท์ อิศรมงคลรักษ์, “การออกแบบอุปกรณ์กักขังสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานใต้สายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.